

GIRE
UTN-FRCU



(Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras)
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN EN EL TIEMPO.
Utilizando cementos CPC 40, CPF 40 y áridos de la zona.

Autores : Ing. María Inés Schierloh, Ing. Roberto F. Souchetti, Ing. Lázaro Deusich, Ing. Héctor Retamal.

Becarios: Lautaro Alza, Agustín Graziani, Marcos Valiente, Fernando Tauber

UTN Concepción del Uruguay

INTRODUCCIÓN

- El grupo G.I.R.E se crea en el año 2005 y posteriormente se hace cargo de trabajos a terceros del laboratorio UTN.
- Uno de los pedidos, era predecir la resistencia del hormigón a los 28 días. Partiendo de ensayos a corta edad.
- Otro pedido (Municipios con pavimento de hormigón), retrotraer la resistencia a 28 días partiendo de testigos de hormigón con varios meses de ejecución.
- En el laboratorio se usaba la fórmula de Ros, que fue hecha para cementos portland normales hoy inexistentes en el mercado y que conducía a errores.
- Las fórmulas actuales (Instrucción española, realizadas para cementos europeos, o la de FIB) también conducían a errores a corta edad y se desconocían las dispersiones por usar pocas series o pastones respecto de la curva madre, desconociéndose si estábamos dentro de la zona de margen de error.
- No encontramos trabajos realizados para los cementos argentinos actuales compuestos y filerizados y áridos de la zona.
- Solicitamos información a las cementeras, sin resultado

OBJETIVOS

- Resolver nuestro propio problema, originado en el laboratorio, para estos trabajos a terceros.
- Determinar una fórmula que permita determinar la evolución del hormigón en el tiempo, para los cementos argentinos actuales más usados en la zona (CPC 40 y CPF 40), para los áridos de la zona (margen del río Uruguay), con una tensión característica H25, relación agua cemento 0,5 y asentamiento de 8 cm.
- Cualquier variación de estos parámetros, se deberán ajustar a los valores de la función encontrada.
- Este es un método de evolución “natural”. Aparte están los métodos acelerados, con aporte de calor, del cual estamos desarrollando un método propio.
- Este es un trabajo de tecnología de materiales por ello nos enfocaremos en la resolución matemática del problema,

DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

- Caracterización de áridos y cemento
- Realización de probetas
- Curado
- Ensayos
- Análisis de los datos

ENSAYOS

- Se realizaron un total de 30 series de probetas, tal cual lo sugieren las normas estadísticas y de esta manera, validar la tarea de este tipo de estudios.
- Para cada serie, se utilizaron un total de doce probetas de hormigón de $h = 30$ cm y diámetro = 15 cm.
- Se ensayaron a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días, haciendo roturas dobles y tomando la media aritmética de los valores de rotura, cuidando que la dispersión no pase del 15% de la media..
- En total se realizaron 360 probetas de hormigón para cada tipo de cemento.

ANALISIS DE DATOS

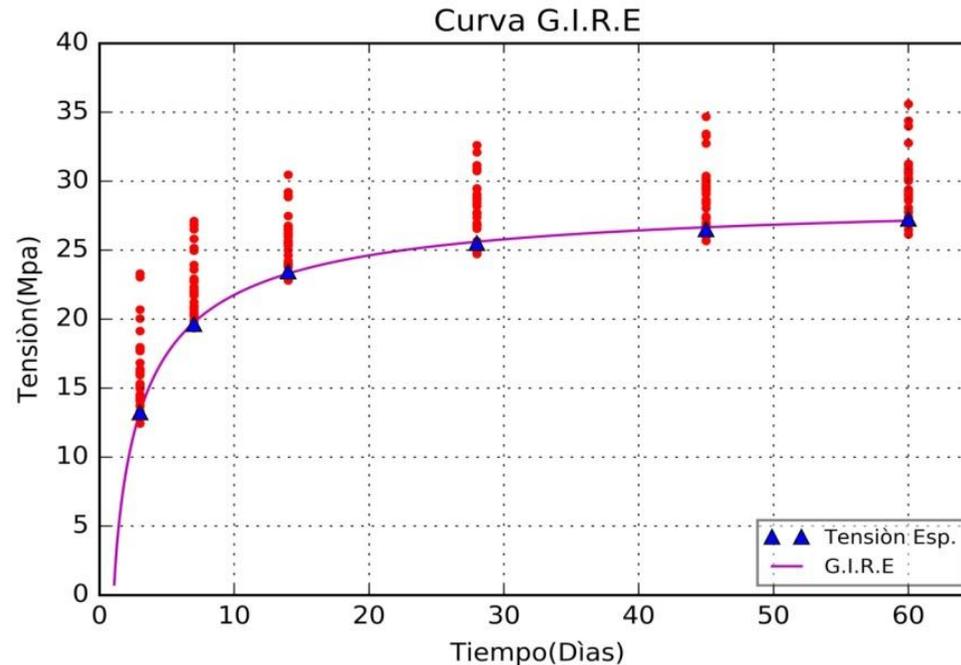
- Comprendió la recopilación de los datos de los ensayos, sus correcciones, armado de planillas y propuesta de la formula de ajuste de la curva.
- Se tomó una cobertura de la curva de Gauss del 90%

VALORES FINALES PARA CPC 40

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K	TENSION CARACTERISTICA Mpa
3	16,60	2,66	1,28	13,19
7	22,44	2,22	1,28	19,59
14	25,86	1,93	1,28	23,39
28	28,09	2,04	1,28	25,48
45	29,36	2,17	1,28	26,58
60	30,16	2,21	1,28	27,33

CURVA TENSION – TIEMPO-CPC 40

- La resistencia a compresión simple y su evolución en el tiempo, es una de las características mecánicas más importante de un hormigón. Dicha evolución, sigue una curva Tensión – Tiempo de forma asintótica . comenzando en cero y aumentando con la edad.

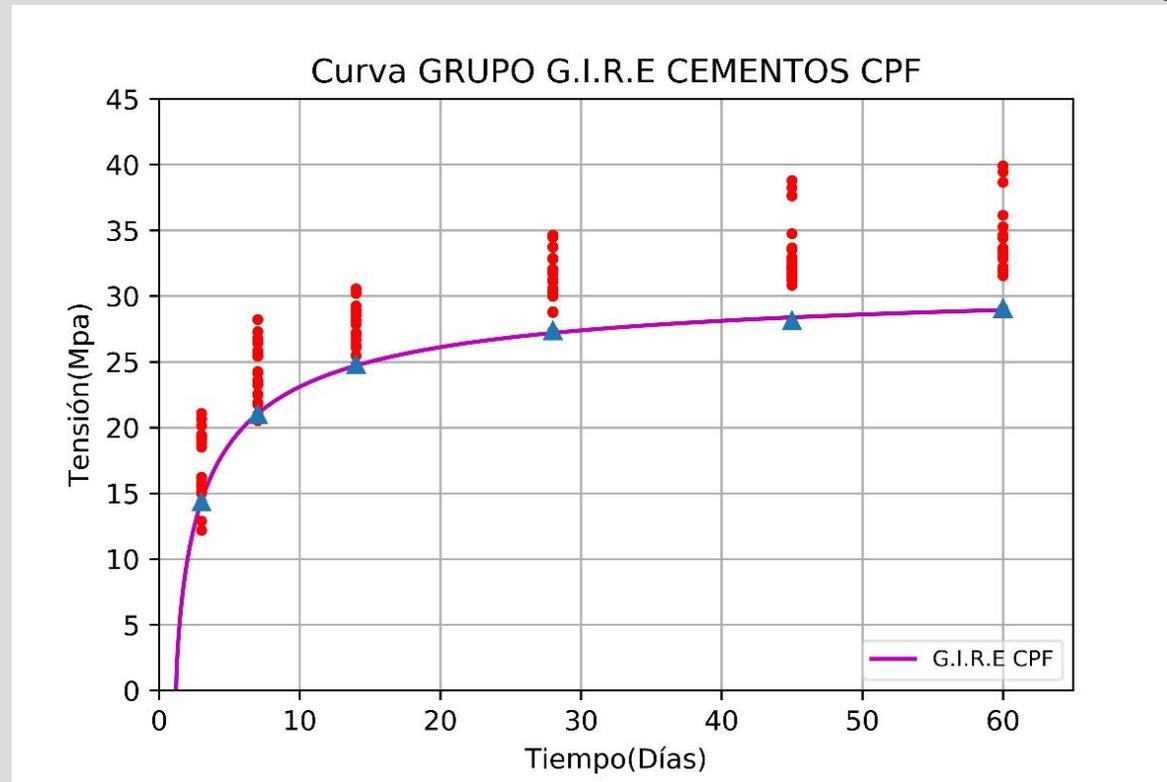


VALORES FINALES PARA CPF 40

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K	TENSION CARACTERISTICA Mpa
3	17,14	2,19	1,28	14,34
7	23,75	2,14	1,28	21,01
14	27,32	1,98	1,28	24,79
28	30,34	2,32	1,28	27,36
45	31,95	2,98	1,28	28,13
60	33,07	3,14	1,28	29,05

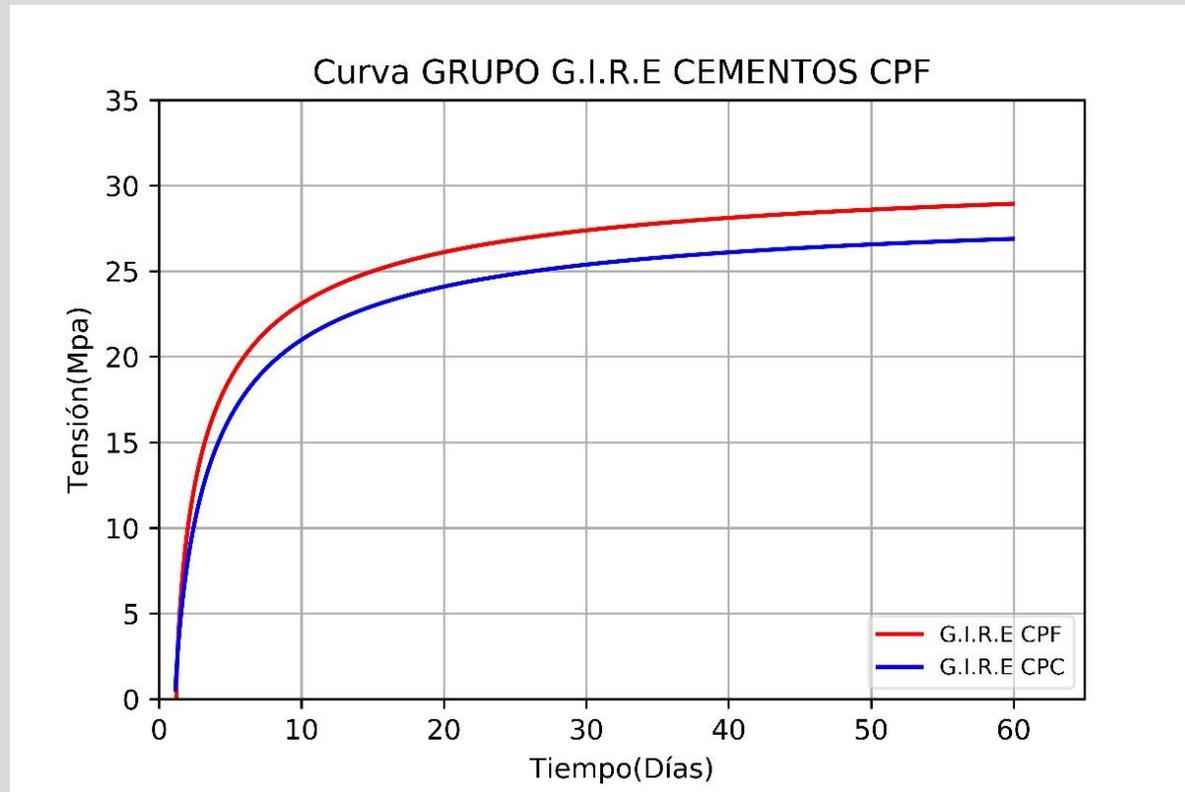
CURVA TENSION – TIEMPO-CPF 40

- La resistencia a compresión simple y su evolución en el tiempo, es una de las características mecánicas más importante de un hormigón. Dicha evolución, sigue una curva Tensión – Tiempo de forma asintótica , comenzando en cero y aumentando con la edad.



CURVA TENSION – TIEMPO-CPF 40 Y CPC 40

- La resistencia a compresión simple y su evolución en el tiempo, es una de las características mecánicas más importante de un hormigón. Dicha evolución, sigue una curva Tensión – Tiempo de forma asintótica , comenzando en cero y aumentando con la edad.



FORMULA PLANTEADA

- Al inicio, se propone la formula exponencial de Ros, que cuenta con tres constantes

Siendo :

σ = Tensión característica a los “t” días

T = Tiempo en días

a, b y c = Constantes a determinar

Esta ecuación, se puede resolver por mínimos cuadrados:

$$\sigma = \sigma_{28} \frac{at^b}{c + t^b}$$

$$S = \sum_t^{3,7,14,28,45,60} (\sigma_{t(ensayo)} - \sigma_{28} \frac{a * t^b}{(c + t^b)})^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \frac{\partial S}{\partial b} = 0, \frac{\partial S}{\partial c} = 0$$

FORMULA PLANTEADA

Al tener infinitas soluciones, el objetivo es determinar la ecuación que se acerque a los valores de ensayo, según la precisión que queramos darle (dos dígitos, tres dígitos, etc).

Estas ecuaciones son muy laboriosas para resolverlas a mano, por ello recurrimos a la informática.

Software y librerías utilizadas :

- Python, – NumPy, – Matplotlib, - Spyder

NUEVA FORMULA PLANTEADA

La formula final propuesta es la siguiente

$$\sigma = \sigma_{28} \frac{a(d+t)^b}{c + (d+t)^b}$$

Para encontrar los coeficientes (a,b,c,y d), se define un vector denominado “coef” que contiene los cuatro números coef=(a,b,c,d)

Para obtener esta serie de coeficiente “a, b, c y d” partimos los rangos presupuestos en espacios iguales, teniendo en cuenta el tamaño del rango y cada cuantos partimos el intervalo, porque si no los cálculos en la computadora llevarías varias horas.

Ejemplo:

$$0 < a < 5 \quad dA = 0.001$$

$$0 < b < 1.5 \quad dB = 0.001$$

$$0 < c < 5 \quad dC = 0.001$$

$$0 < d < 5 \quad dC = 0.001$$

Ej. Para el coeficiente “a”, le damos el rango entre 0 y 5. Como hay infinitos valores en ese rango, le damos una partición de 0,001. O sea que dividimos el intervalo en 5000 partes.

Con esta división de rangos, el programa puede realizar todas las combinaciones posibles entre los valores de a, b, c y d y encontrar la curva de mejor ajuste.

DETERMINACION CURVA

Para ellos se calcula la desviación de la curva encontrada y los puntos experimentales de la siguiente forma:
Determinamos la diferencia éntrelos valores de la curva y los datos experimentales

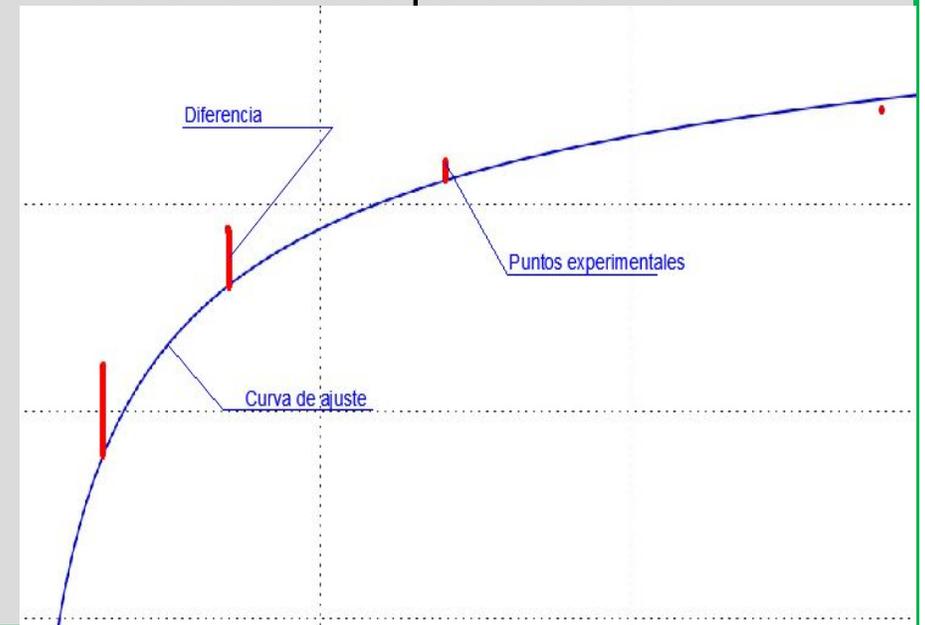
$$\Delta(t) = \sigma(t) - \sigma_{Ensayos}(t)$$

Como las probetas se ensaya a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días , tendremos 6 diferencias para la curva

$$\Delta(3), \Delta(7), \Delta(14), \Delta(28), \Delta(45), \Delta(60)$$

Pero estos valores pueden estar por encima o debajo de la curva, por lo que al sumarlos se podrían cancelar y el valor de desviación no sería el correcto para lo cual elevamos al cuadrado cada una de las diferencias, de tal manera de trabajar siempre con valores absolutos

$$\Delta^2$$



DETERMINACION CURVA

Para obtener el promedio de estas diferencias hacemos

$$\Sigma \Delta^2 / 6$$

Como los números que se obtienen son demasiado grandes para trabajar con ellos, le aplicamos raíz cuadrada.

Desarrollando la formula, vemos que es la desviación estándar.

$$\text{Desviacion}([a, b, c, d]) = \sqrt{\frac{\Sigma \Delta^2}{6}}$$

$$\text{Desviacion}([a, b, c, d]) = \sqrt{\frac{\Sigma \Delta \sigma(t) - \sigma_{\text{Ensayos}}(t)^2}{6}}$$

La mejor curva, es la de menor Desviación

EJEMPLO DE RANGO

Los rangos de arriba supondrían generar de posibles combinaciones y después tendría que calcular el mismo número de desviación y luego encontrar el mínimo, lo que llevarías con una computadora de escritorio tardaría más de 112 hs

Esta cantidad, es solamente para conseguir una precisión al tercer dígito. Al cuarto dígito, sería como multiplicar por 10.000 las combinaciones antes mencionadas. Ante tanta complejidad, se desistió de realizar este camino de tantas combinaciones

$$\frac{5}{0.001} * \frac{1.5}{0.001} * \frac{5}{0.001} * \frac{5}{0.001} = 187.500.000.000.000$$

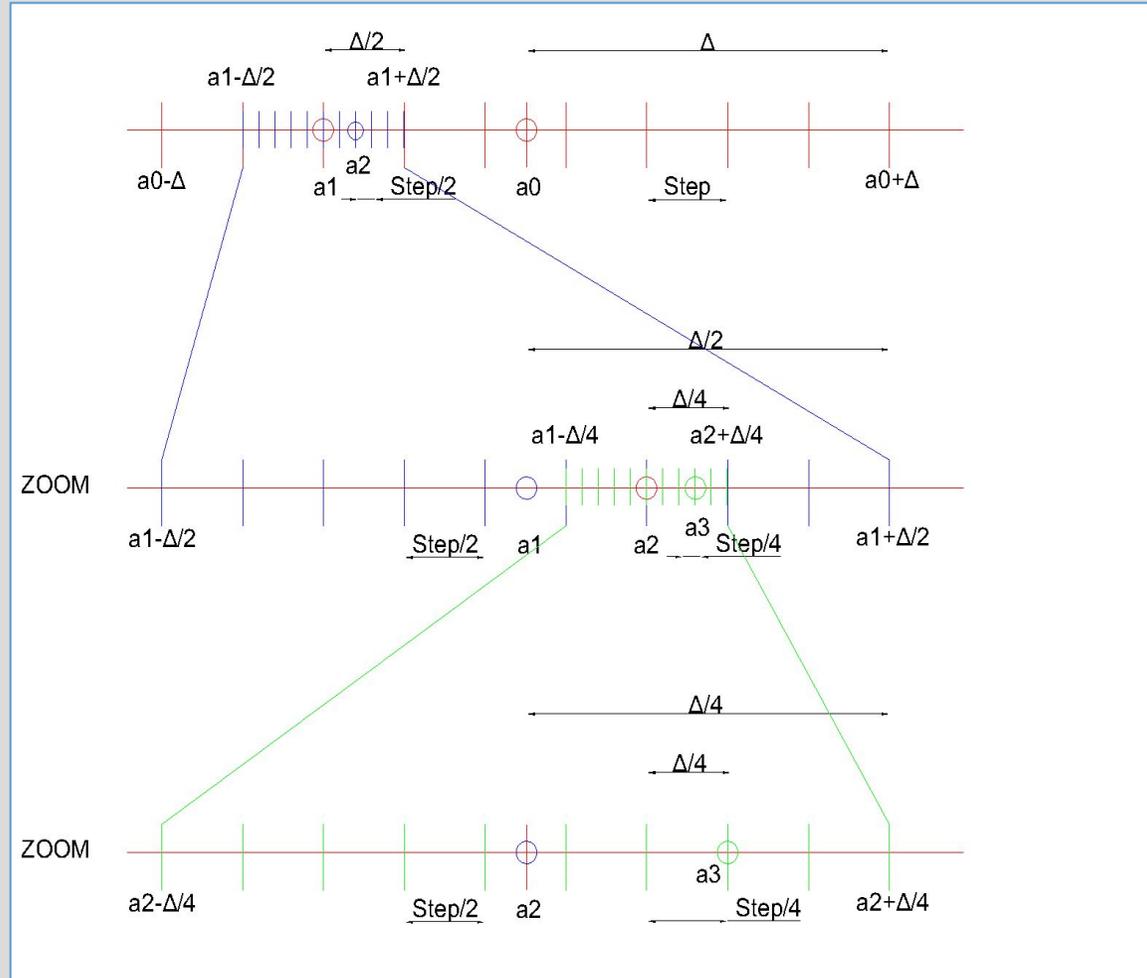
EJEMPLO DE RANGO

Finalmente se optó por escoger valores de equipartición del rango más grandes, y cuando tenemos los coeficientes con mínima desviación, procedemos a afinar el rango y a afinar el tamaño de equipartición.

Ej. Para el coeficiente “a”, se empieza por a_0 , el cual toma un rango $a_0 + \Delta$ y $a_0 - \Delta$, divide el rango en partes iguales de “step”, se calcula la desviación y selecciona como a_1 el que mínima desviación genere. Posteriormente toma el rango $a_1 + \Delta/2$ y $a_1 - \Delta/2$, divide el rango en “step/2” y selecciona como a_2 el que genere mínima desviación. Así sucesivamente divide en dos el rango y en 2 el “step”, para ir acotando la mejor solución hasta que la diferencia entre dos desviaciones sucesiva sea menor a 0.001.

De igual manera se procedió para los otros coeficientes.

EJEMPLO DE RANGO



RESULTADOS DE PYTHON

RESULTADO DE LA CURVA DE TENSION ESPECIFICA PARA LAS TREINTA (30) SERIES

	Especifica(Curva final) CPC 40
a	1,1375
b	0,83125
c	2,0625
d	-1,06875

	Especifica(Curva final) CPF 40
a	1,15
b	0,75
c	1,85
d	-1,20

CURVA Y FORMULA RESULTANTE

La formula resultante es:

CPC 40

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{1,1375(-1,06875 + t)^{0,83125}}{2,0625 + (-1,06875 + t)^{0,83125}}$$

CPF 40

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{1,15(-1,20 + t)^{0,75}}{1,85 + (-1,20 + t)^{0,75}}$$

COMPARACION ENTRE VALORES DE ENSAYO Y FORMULA G.I.R.E.

La siguiente tabla, expresa la comparación entre los valores obtenidos con los ensayos y los expresados con la fórmula del grupo G.I.R.E..(CPC 40)

DIAS DE ROTURA	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN ENSAYOS Mpa	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN FORMULA GRUPO GIRE Mpa	DIFERENCIA ABSOLUTA Mpa
3	13,19	13,21	0,02
7	19,59	19,72	0,13
14	23,39	23,27	0,12
28	25,48	25,57	0,09
45	26,58	26,62	0,04
60	27,33	27,09	0,24

Se observa una diferencia ínfima entre ambos valores

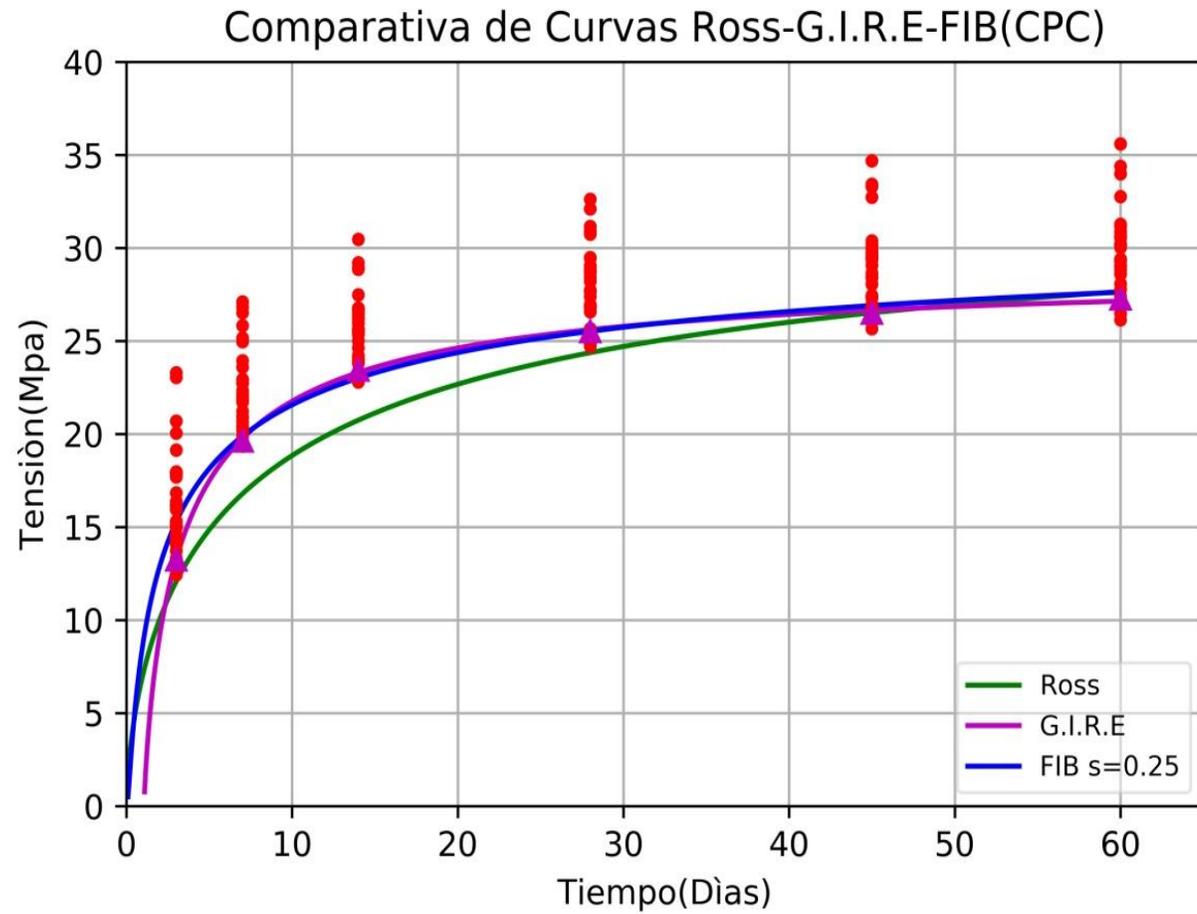
COMPARACION ENTRE VALORES DE ENSAYO Y FORMULA G.I.R.E.

La siguiente tabla, expresa la comparación entre los valores obtenidos con los ensayos y los expresados con la fórmula del grupo G.I.R.E..(CPF 40)

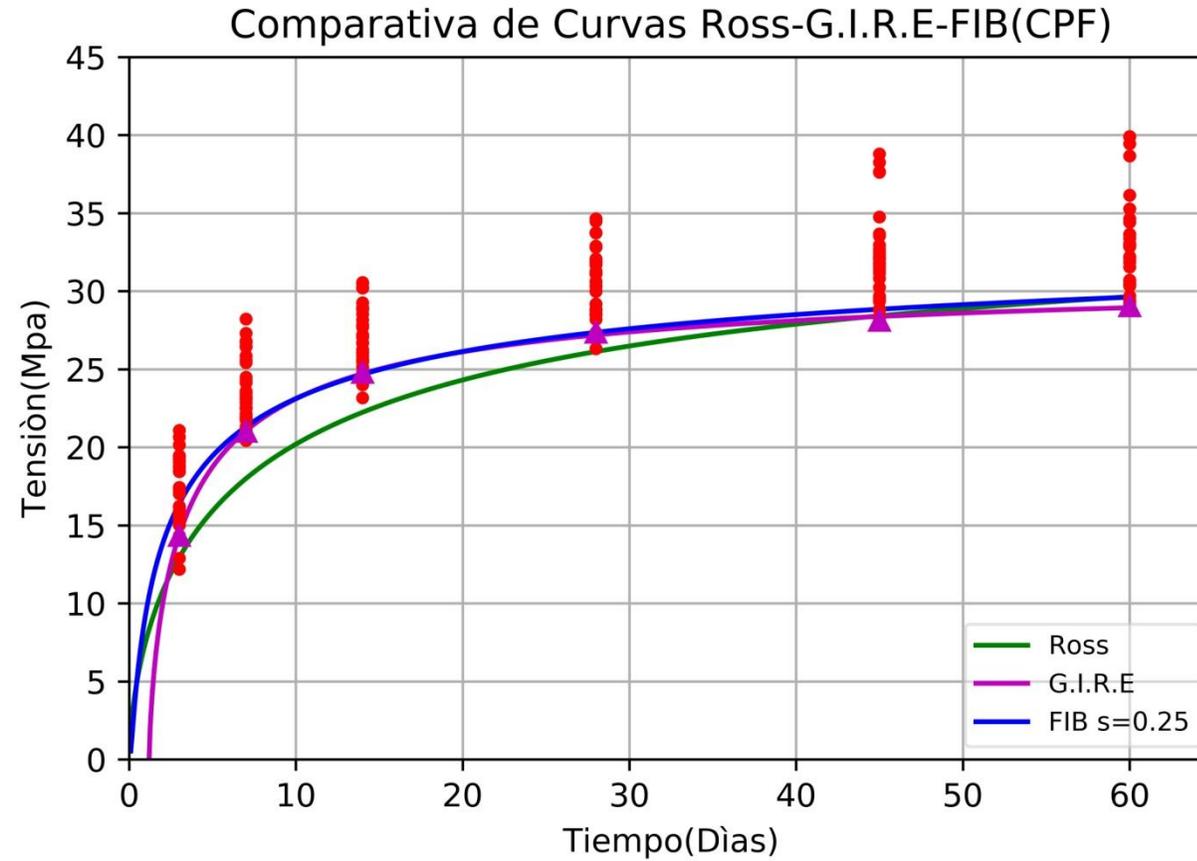
DIAS DE ROTURA	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN ENSAYOS Mpa	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN FORMULA GRUPO GIRE Mpa	DIFERENCIA ABSOLUTA Mpa
3	14,34	14,36	0,02
7	21,01	21,05	0,04
14	24,79	24,71	0,08
28	27,36	27,19	0,17
45	28,13	28,38	0,25
60	29,05	28,94	0,11

Se observa una diferencia ínfima entre ambos valores

Curvas comparativas G.I.R.E.- F.I.B. y Ros



Curvas comparativas G.I.R.E.- F.I.B. y Ros



INDICE DE CONFIANZA

INDICE DE CONFIANZA, es el porcentaje de probabilidades de que una desviación, en el control de calidad de un hormigón ocurra.

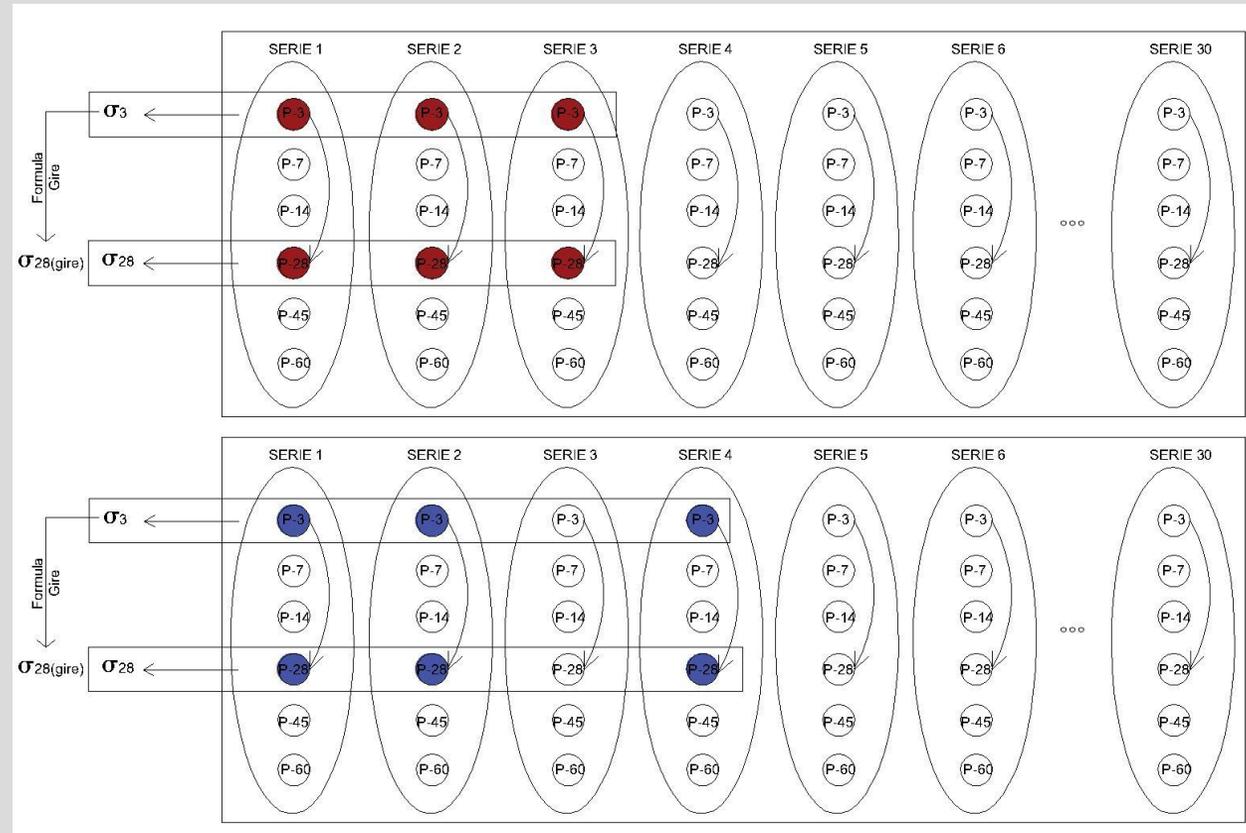
Se desarrollo un software que realiza para cada día, todas las combinaciones posibles tomadas de a tres, cuatro, cinco, etc, y calcula las desviaciones entre la resistencia teórica por formula GIRE y la real del ensayo a 28 días.

Ej. para tres días

INDICE DE CONFIANZA

Tensión característica o especificada $\sigma_k = \sigma_m - (k * S)$

N°	95%	90%	80%
3	2,92	1,89	1,06
4	2,35	1,64	0,98
5	2,13	1,53	0,94
6	2,02	1,48	0,92
7	1,94	1,44	0,91
8	1,90	1,42	0,90
9	1,86	1,40	0,89
10	1,83	1,38	0,88
11	1,81	1,37	0,88
12	1,80	1,36	0,88
13	1,78	1,36	0,87
14	1,77	1,35	0,87
15	1,76	1,34	0,87
16	1,75	1,34	0,87
17	1,75	1,34	0,87
18	1,74	1,33	0,86
19	1,73	1,33	0,86
20	1,73	1,33	0,86
21	1,73	1,33	0,86
22	1,72	1,32	0,86
23	1,72	1,32	0,86
24	1,71	1,32	0,86
25	1,71	1,32	0,86
26	1,71	1,32	0,86
27	1,71	1,32	0,86
28	1,70	1,31	0,86
29	1,70	1,31	0,85
30 o más	1,64	1,28	0,85



COEFICIENTE DE AJUSTE CPC 40

%DIF(T28gire-t28real)	3 DIAS-28DIAS			%DIF(T28gire-t28real)	7 DIAS-28DIAS			%DIF(T28gire-t28real)	14 DIAS-28DIAS		
	3 probetas	4 probetas	5 probetas		3 probetas	4 probetas	5 probetas		3 probetas	4 probetas	5 probetas
1	5,67	7,21	8,75	1	9,56	14,18	16,88	1	19,56	24,56	28,78
3	17,17	21,80	26,01	3	31,82	39,87	47,27	3	60,52	73,20	81,19
5	28,62	36,38	42,36	5	49,21	61,35	70,12	5	85,59	93,80	98,25
7	41,13	49,95	57,31	7	63,92	77,26	85,56	7	94,29	99,32	99,90
9	51,82	62,11	70,18	9	76,65	88,00	94,05	9	98,99	99,93	100,00
11	61,70	72,42	80,08	11	85,64	94,53	97,73	11	99,73	100,00	100,00
13	69,46	80,25	87,06	13	91,13	97,54	99,16	13	99,93	100,00	100,00
15	75,47	85,78	91,55	15	94,46	98,80	99,74	15	100,00	100,00	100,00
17	80,32	89,55	94,38	17	96,45	99,42	99,95	17	100,00	100,00	100,00
19	84,14	92,47	96,28	19	98,20	99,74	99,98	19	100,00	100,00	100,00
21	87,32	94,50	97,52	21	99,16	99,92	100,00	21	100,00	100,00	100,00
23	89,95	95,95	98,32	23	99,51	99,99	100,00	23	100,00	100,00	100,00
25	91,55	96,92	98,86	25	99,68	99,99	100,00	25	100,00	100,00	100,00
27	93,15	97,63	99,24	27	99,75	100,00	100,00	27	100,00	100,00	100,00
29	94,04	98,24	99,51	29	99,75	100,00	100,00	29	100,00	100,00	100,00
31	94,90	98,67	99,69	31	99,95	100,00	100,00	31	100,00	100,00	100,00
33	95,81	99,01	99,81	33	100,00	100,00	100,00	33	100,00	100,00	100,00
35	96,45	99,23	99,89	35	100,00	100,00	100,00	35	100,00	100,00	100,00
37	96,95	99,44	99,94	37	100,00	100,00	100,00	37	100,00	100,00	100,00
39	97,56	99,58	99,97	39	100,00	100,00	100,00	39	100,00	100,00	100,00
41	98,00	99,69	99,99	41	100,00	100,00	100,00	41	100,00	100,00	100,00
43	98,25	99,78	99,99	43	100,00	100,00	100,00	43	100,00	100,00	100,00
45	98,40	99,84	100,00	45	100,00	100,00	100,00	45	100,00	100,00	100,00
47	98,57	99,91	100,00	47	100,00	100,00	100,00	47	100,00	100,00	100,00
49	98,79	99,93	100,00	49	100,00	100,00	100,00	49	100,00	100,00	100,00

COEFICIENTE DE AJUSTE CPF 40

%DIF(T28gire-t28real)	3 DIAS-28DIAS			%DIF(T28gire-t28real)	7 DIAS-28DIAS			%DIF(T28gire-t28real)	14 DIAS-28DIAS		
	3 probetas	4 probetas	5 probetas		3 probetas	4 probetas	5 probetas		3 probetas	4 probetas	5 probetas
1	6,26	6,25	6,52	1	11,97	15,06	17,67	1	16,40	20,80	24,15
3	17,39	18,62	19,75	3	32,64	42,52	49,57	3	47,07	57,34	65,53
5	28,08	30,87	33,12	5	51,63	64,38	72,61	5	68,77	81,28	89,72
7	37,78	42,46	45,84	7	68,72	80,11	87,03	7	83,52	94,99	98,51
9	47,24	53,10	57,50	9	80,17	89,62	94,40	9	93,87	99,11	99,91
11	55,27	62,03	67,66	11	87,81	94,61	97,66	11	98,23	99,92	100,00
13	62,34	69,18	75,90	13	92,36	97,01	98,96	13	99,56	100,00	100,00
15	66,85	74,47	82,00	15	94,88	98,45	99,58	15	99,90	100,00	100,00
17	70,94	79,07	86,53	17	96,38	99,15	99,85	17	100,00	100,00	100,00
19	75,17	83,16	90,07	19	97,36	99,55	99,96	19	100,00	100,00	100,00
21	79,14	86,52	92,89	21	98,05	99,79	99,99	21	100,00	100,00	100,00
23	81,90	89,59	94,84	23	98,67	99,95	100,00	23	100,00	100,00	100,00
25	84,19	91,79	96,25	25	99,31	99,99	100,00	25	100,00	100,00	100,00
27	85,71	93,45	97,23	27	99,66	100,00	100,00	27	100,00	100,00	100,00
29	87,61	94,97	97,98	29	99,83	100,00	100,00	29	100,00	100,00	100,00
31	89,36	95,99	98,50	31	99,85	100,00	100,00	31	100,00	100,00	100,00
33	90,42	96,99	98,92	33	99,95	100,00	100,00	33	100,00	100,00	100,00
35	91,31	97,72	99,26	35	100,00	100,00	100,00	35	100,00	100,00	100,00
37	92,17	98,18	99,48	37	100,00	100,00	100,00	37	100,00	100,00	100,00
39	93,25	98,58	99,66	39	100,00	100,00	100,00	39	100,00	100,00	100,00
41	94,36	98,95	99,76	41	100,00	100,00	100,00	41	100,00	100,00	100,00
43	95,07	99,21	99,86	43	100,00	100,00	100,00	43	100,00	100,00	100,00
45	96,01	99,38	99,91	45	100,00	100,00	100,00	45	100,00	100,00	100,00
47	96,70	99,55	99,95	47	100,00	100,00	100,00	47	100,00	100,00	100,00
49	97,17	99,64	99,98	49	100,00	100,00	100,00	49	100,00	100,00	100,00

COEFICIENTE DE AJUSTE CPF 40

$$0.3 = \frac{t_{28 \text{ gire}} - t_{28}}{t_{28 \text{ gire}}}$$

$$0.3 \times t_{28 \text{ gire}} = t_{28 \text{ gire}} - t_{28}$$

$$t_{28} = t_{28 \text{ gire}} - 0.3 \times t_{28 \text{ gire}}$$

$$t_{28} = 0.7 \times t_{28 \text{ gire}}$$

FACTORES DE CORRECCION CPC 40			
Dias	3 probetas	4 probetas	5 probetas
3	0,763	0,823	0,855
7	0,863	0,904	0,920
14	0,940	0,954	0,960

FACTORES DE CORRECCION CPF 40			
Dias	3 probetas	4 probetas	5 probetas
3	0,678	0,766	0,810
7	0,880	0,909	0,922
14	0,918	0,937	0,949

EJEMPLO CPC40

	3	7	14	28	45	60
1	16,84	20,94	24,63	27,73	29,73	31,27
2	17,88	22,02	25,58	27,68	29,63	30,12
3	17,91	22,74	25,64	27,66	28,38	29,28
4	20,05	25,83	28,86	29,05	29,49	30,19
5	14,07	20,66	23,05	24,84	25,67	26,14
6	16,16	21,72	24,05	25,66	26,81	27,40
7	20,70	23,94	25,53	26,79	28,05	29,06
8	17,81	24,96	25,66	26,90	27,32	27,78
9	16,14	22,14	23,93	25,50	26,99	28,60
10	17,70	22,92	26,71	28,75	29,36	30,04
11	17,97	22,94	26,77	29,45	30,21	30,54
12	17,97	20,89	26,72	30,74	32,74	32,77
13	15,32	21,79	25,46	27,72	29,44	30,12
14	15,31	20,22	23,88	26,57	28,66	29,41
15	14,24	20,40	25,01	27,38	29,08	30,21
16	12,43	19,88	26,25	29,01	29,50	30,21
17	15,09	21,22	24,23	26,83	27,45	28,80
18	13,72	20,41	25,96	29,49	30,38	30,87
19	16,37	25,16	27,49	30,91	27,38	28,08
20	19,14	26,52	28,95	31,16	33,29	33,99
21	14,53	19,63	22,80	24,72	26,76	27,27
22	16,14	23,60	26,55	28,43	29,60	30,18
23	15,95	22,75	26,67	28,81	29,89	31,16
24	13,33	19,61	23,04	26,79	28,50	29,01
25	23,30	26,82	29,21	32,10	33,43	34,38
26	23,05	27,11	30,47	32,62	34,68	35,60
27	14,97	21,88	25,34	26,95	28,45	29,41
28	14,29	19,36	23,81	25,49	25,99	26,48
29	14,45	22,34	26,17	28,21	29,49	30,64
30	15,13	22,75	26,44	28,69	30,05	30,63

σ_m	14,91	21,48	26,21
S	2,14786846	2,22772009	2,54
k	1,89	1,89	1,89
σ_k	10,852663	17,268487	21,42
$\sigma_k(28 \text{ gire})$	20,9456396	22,4490331	23,56
Coef* $\sigma_k(28 \text{ gire})$	15,9186861	19,3061684	22,15

σ_m	27,70	28,10	28,01
S	1,78980011	2,28087927	2,19118219
k	1,89	1,89	1,89
σ_k	24,32049582	23,7939862	23,8672706
Coef* $\sigma_k(28 \text{ gire})$	15,91868611	19,3061684	22,1451716
Diferencia	8,401809716	4,48781779	1,72209895
Diferencia%	0,345462106	0,18861143	0,07215316

PRESENTACIÓN EN UN LIBRO



Editorial Académica Española (08.05.2019)

<https://www.eae-publishing.com/>

EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN EN EL TIEMPO.
Utilizando cemento compuesto CPC40 y fillerizado CPF40

Detalles de libro:

ISBN-13:	978-613-9-44051-1
ISBN-10:	6139440513
EAN:	9786139440511
Idioma del libro:	Español
Por (autor):	María Inés Schierloh Roberto F. Souchetti Lázaro Deusich
Número de páginas:	240
Publicado en:	08.05.2019
Categoría:	Tecnología

¡GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

Por más información, visitar:

www.frcu.utn.edu.ar/gire/